



**HAL**  
open science

## Structures précontraintes en pierre massive : cas d'étude d'un escalier monumental

Marine Bagnéris, Fabien Cherblanc, Olivier Chastel, Michel Bozzi

### ► To cite this version:

Marine Bagnéris, Fabien Cherblanc, Olivier Chastel, Michel Bozzi. Structures précontraintes en pierre massive : cas d'étude d'un escalier monumental. Journées Nationales des Maçonneries , Mar 2016, Marne-la-Vallée, France. hal-01291632

**HAL Id: hal-01291632**

**<https://hal.science/hal-01291632>**

Submitted on 21 Mar 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# STRUCTURES PRÉCONTRAINTE EN PIERRE MASSIVE

## CAS D'ÉTUDE D'UN ESCALIER MONUMENTAL

*BAGNERIS M.<sup>1</sup>, CHERBLANC F.<sup>2</sup>, CHASTEL O.<sup>3</sup>, BOZZI M.<sup>4</sup>*

### Introduction

La structure étudiée est un escalier en quart tournant dont la forme a été préalablement conçue par un designer. Composé de six voussoirs en calcaire, il permet de s'élever d'une hauteur d'étage de 3m. L'inaptitude à la reprise d'efforts de traction propre à ce type d'ouvrage rend impérative l'introduction d'une précontrainte initiale à tout chargement [2][5]. L'approche méthodologique choisie pour la validation de la stabilité de l'escalier consiste à étudier premièrement la trajectoire optimale des câbles de précontrainte puis d'évaluer le niveau de tension nécessaire pour contenir la ligne de pression à l'intérieur des sections de matière. La structure est modélisée comme une poutre isostatique ce qui présente l'avantage de comparer les résultats numériques à ceux obtenus par une résolution analytique. La présente étude se place dans un cadre normatif aux ELU pour la définition de la combinaison des charges de poids propre et d'exploitation.

### Détermination de la trajectoire des câbles

L'escalier est modélisé par un limon continu avec un comportement linéaire élastique. La visualisation des contraintes principales (Figure 1) fait apparaître deux zones soumises majoritairement à de la traction ; la première sur la fibre inférieure des voussoirs les plus élevés, la seconde au niveau du limon intérieur due au couple de basculement dans la liaison avec la fondation. Les trajets des câbles tendent à suivre les lignes isostatiques (tangentes aux directions principales) dans les zones où les contraintes de traction sont maximales. Afin de reprendre la traction dans les deux zones identifiées précédemment, trois câbles sont introduits dans la structure. En raison de la complexité géométrique de l'ouvrage, les courbures imposées par les chemins de câbles au passage des joints entre les voussoirs ajoutent des moments de flexion qui se superposent aux efforts de traction sollicitant les câbles. La prise en compte de l'effet de la courbure est déterminante pour le dimensionnement des câbles et le niveau de précontrainte limite à imposer pour la stabilité de l'escalier.

---

1Marine, BAGNERIS, MAP-Gamsau UMR 3495 CNRS/MCC, [marine.bagneris@gamsau.archi.fr](mailto:marine.bagneris@gamsau.archi.fr)

2Fabien, CHERBLANC, LMGC UMR 5508 CNRS/UM, [fabien.cherblanc@umontpellier.fr](mailto:fabien.cherblanc@umontpellier.fr)

3Olivier, CHASTEL, Atelier du Grain d'Orge, [contact@legraindorge.com](mailto:contact@legraindorge.com)

4Michel, BOZZI, Atelier Jean-Loup Bouvier, [michel.bozzi@atelierjeanloupbouvier.com](mailto:michel.bozzi@atelierjeanloupbouvier.com)

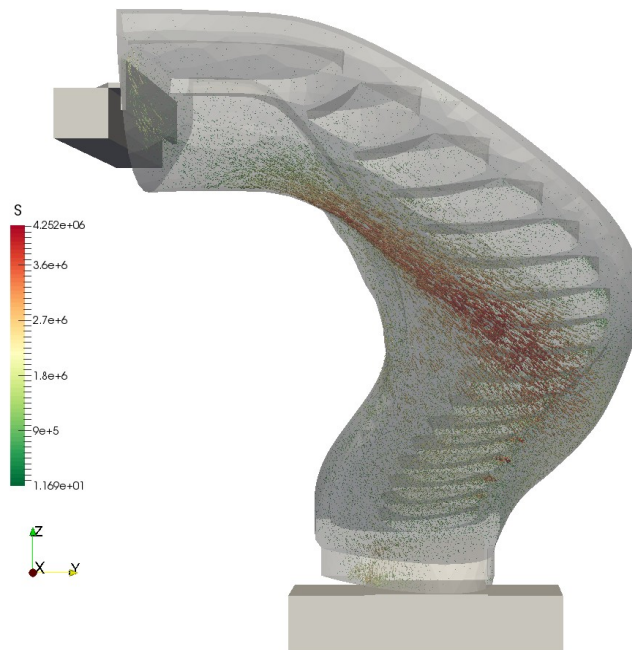


Figure 1: Visualisation des contraintes principales de traction

## Détermination du niveau de précontrainte

### Modélisation de l'action des câbles sur les voussoirs

Les trajectoires des câbles sont rectilignes à l'intérieur des voussoirs pour des raisons pratiques de percements. La forme de l'escalier impose un changement de direction aux passages des joints. L'effet « poulie » qui résulte de l'action d'un câble sur deux voussoirs adjacents est modélisé avec frottement, ce qui se traduit par deux forces ponctuelles avec des composantes perpendiculaires et tangentielles au trajet du câble. L'écriture de l'équilibre d'une portion de câble localisée au voisinage du plan de joint en prenant en compte le frottement conduit à une perte de tension du câble qui dépend du coefficient de frottement et de l'angle entre les directions du câble au passage du joint.

### Modélisation analytique de l'escalier

L'escalier est modélisé par une poutre courbe articulée en pied et simplement appuyée en tête. Au niveau des joints entre les voussoirs, la réduction du torseur de cohésion au point où le moment de flexion est nul permet de localiser le centre de poussée (Figure 2). La règle du tiers central [3] étant très conservatrice, nous nous sommes astreints à vérifier que le centre de poussée reste confiné à l'intérieur de la section de matière et qu'aucune décompression des joints ne s'observe à l'ELS. Il en résulte une tension de 170 kN pour les câbles extérieur et central et de 150kN pour le câble intérieur. Cette approche permet aussi de mettre en évidence un couple de torsion au niveau des joints. Dans la solution technique retenue, les efforts de cisaillement sont repris par des platines métalliques goujonnées.

### Modélisation par éléments discrets

Les calculs sont effectués sur la plateforme LMGC90 [1] basée sur la méthode Non-Smooth Contact Dynamic [4]. L'approche par éléments discrets permet de caractériser la cinématique de chacun des éléments par la résolution des équations de la dynamique. La formulation implicite permet notamment de prendre en compte

des lois d'interaction non-régulières telles que le contact unilatéral et le frottement de Coulomb. Sachant que les efforts tangentiels dans les joints sont repris par des éléments métalliques, la loi d'interaction introduite dans la simulation est choisie de façon à bloquer le glissement au contact sans toutefois s'opposer à l'ouverture des joints. On observe sur la Figure 2 la localisation et l'intensité des réactions de contact entre voussoirs modélisés comme des éléments rigides.

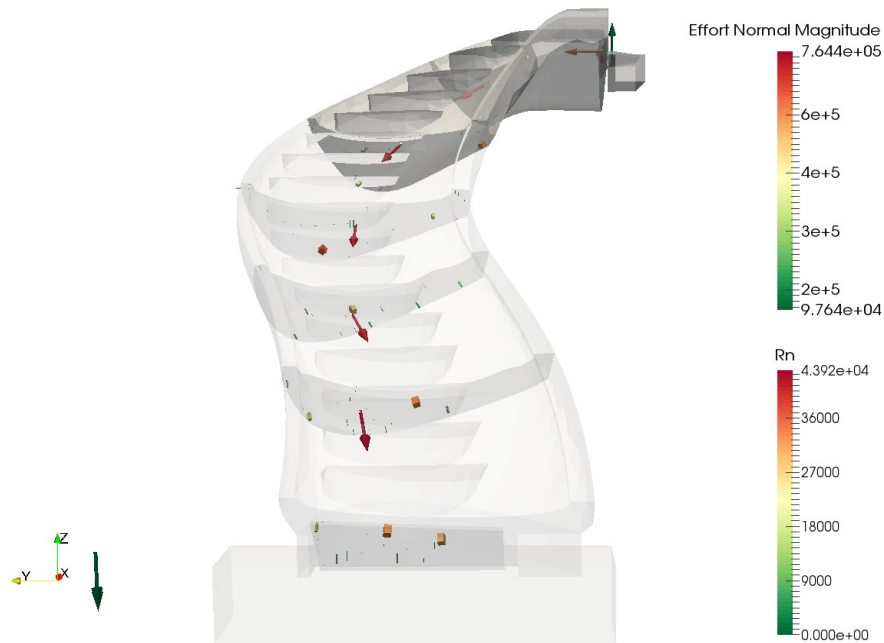


Figure 2: Localisation des centres de poussée et des efforts de contact aux plans de joints

## Conclusion et perspectives

La simplicité du modèle mécanique étudié, une poutre isostatique sur deux appuis, soulève néanmoins des questionnements non triviaux en raison de la complexité morphologique et de la nature discrète d'une structure composée de blocs. La cohérence des résultats issus de l'approche analytique et des simulations numériques permet de rendre prédictible le comportement mécanique d'un escalier précontraint en pierre massive. Le prémontage en atelier et la mise en œuvre finale de l'ouvrage fut l'occasion de valider notre analyse par l'expérimentation physique.

## Références

- [1] Dubois, F., Jean, M., Renouf, M., Mozul, R., Martin, A., Bagneris, M. LMGC90, 10ième Colloque National en Calcul des Structures, Giens, 2011.
- [2] Fallacara, G., Bagneris, M., Calabria, C. The structural tree : new experimentation with reinforced stone. 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, Tirana, Albania., 2013.
- [3] Heyman, J. The stone skeleton. International Journal of Solids and Structures, 1966, vol. 2, n°2, p.249-279.
- [4] Jean, M. The non-smooth contact dynamic method. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1999, vol.177, p.235-257.
- [5] Perales, R. Modélisation du comportement mécanique par éléments discrets des ouvrages maçonnés tridimensionnels. Contribution à la définition d'éléments de contacts surfaciques. Thèse de doctorat. : Université de Montpellier II, 2007.